1. **ШУМ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ**
   1. **Источники шумов на цифровых изображениях**
      1. **Технология производства фоточувствительной матрицы**

**Шум на изображениях представляет собой некоторый набор дефектов в полученном кадре, которые** проявляются в виде хаотично расположенных элементов растра (пикселов), имеющих размер близкий к размеру пикселя. Особенно он заметен на однотонных поверхностях – небо, кожа, участки теней.

**Природа шума многообразна, но основным его источником в современной цифровой камере является сам фотоприемник. К числу «постоянных» шумов, характер которых не меняется от кадра к кадру,** можно отнести наличие «горячих» и «битых» пикселов на матрице, число **которых зависит от** технологического процесса на заводе изготовителя.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2.1 – «Битые» пикселы в сенсоре фотоаппарата |

На месте «битых» пикселей в кадре всегда будут наблюдаться темные точки. Это связано с различными дефектами в полупроводниковой подложке, которые возникают в процессе обработки, или обусловлены наличием различных примесей в ней из-за недостаточной степени очистки кремниевой пластины, а также дефектами потенциального барьера, возникающего на этапах формирования структуры фоточувствительной области, которые вызывают утечку накопленного заряда в объем полупроводниковой пластины.

На рисунке 2.1 показан снимок с фотокамеры, у которой в центре матрицы сосредоточено большое число «битых» пикселов, что выражается в виде большого черного пятна на изображении.

В отличие от «битых» пикселов, так называемые «горячие» (hot) пикселы проявляются только при длительных выдержках, когда фоточувствительная матрица заметно нагревается. Проявляться горячие пиксели могут в виде ярких точек, расположенных на одном и том же месте от кадра к кадру. Как видно из рисунка 2.2., при низкой температуре самой матрицы никаких артефактов не наблюдается. Однако при повышении температуры до уровня комнатной температуры становятся заметны яркие пикселы, и при дальнейшем увеличении температуры сенсора количество и размер ярких белых пятен продолжает расти, причем зависимость носит явно нелинейный характер.



Рисунок 2.2 – Проявление «горячих» пикселов при прогреве матрицы

### Физические процессы при накоплении и считывания кадра

Помимо «битых» и «горячих» пикселов, которые относятся к «постоянному» типу шумов, на изображении присутствуют также и «случайные» шумы. Их наличие обусловлено физическими процессами, происходящими в процессе работы самой матрицы. К числу основных составляющих данного типа шума можно отнести:

* Фотонный шум (также дробовой или пуассоновский);
* Тепловой шум;
* Шум считывания;
* Шум квантования;

Фотонный шум является следствием дискретной природы света. Число квантов энергии, попадающих на фоточувствительную поверхность матрицы, флуктуирует. Интенсивность фотонного шума равна квадратному корню из количества сигнальных фотонов и она определяет максимальный уровень отношения сигнал/шум, который может быть достигнут в идеальных условиях для не шумящего фотоприемника, так как этот тип шума невозможно ликвидировать. И в отличие от теплового шума, рассматриваемого далее, его уровень никак не зависит от температуры и прочих условий.

Распределение значений уровня фотонного шума представляет собой распределение по Пуассону, которое при высоких значения математического ожидания вырождается в нормальное распределение Гаусса. Визуально на изображениях фотонный шум проявляется также как и белый шум, т.е. появляется ощущение, что на поверхности изображения присутствует мелкий песок (рисунок 2.3).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Исходное изображение | Добавлен пуассоновский шум |
| Рисунок 2.3 – Визуальное проявление фотонного шума на изображении | |

Тепловой же шум связан с термоэлектронной эмиссией, происходящей в полупроводниковой подложке, из которой изготавливаются фоточувствительные матрицы. В результате тепловых колебаний атомов кристаллической решетки полупроводника могут высвобождаться свободные электроны, которые затем накапливаются в потенциальных ямах вместе с основным информационным зарядом. Поэтому даже в условиях полного отсутствия освещения в потенциальных ямах будет скапливаться ненулевой уровень заряда (рисунок 2.4).

Основной причиной возникновения так называемого «темнового тока» является наличие примесей в кремниевой пластине либо повреждения структуры кристаллической решетки, образовавшиеся на этапах подготовки полупроводниковой пластины. Чем меньше примесей, тем меньше будет уровень темнового тока.

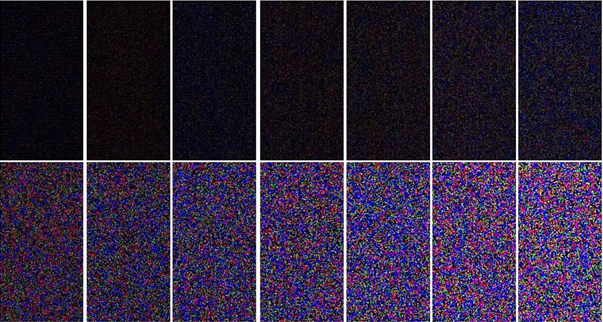


Рисунок 2.4 – Проявление тепловых шумов при различном времени экспозиции в условиях полного отсутствия внешнего освещения

Скорость формирования темнового заряда никак не связана с информационным зарядом, который индуцируется падающими фотонами, что вносит некоторую неопределенность в его величину, накопленную за определенный промежуток времени, и не позволяет просто вычесть его уровень при считывании зарядового пакета. Однако величина накопленного заряда сильно зависит от температуры подложки. Например, при охлаждении температуры матрицы на 6-8 градусов величина темнового тока падает в 2 раза, поэтому для получения качественного снимка с низким уровнем теплового шума камеры часто принудительно охлаждают во время использования. Охлаждение подложки до температуры всего лишь -30 градусов по Цельсию снижает влияние темнового тока практически до пренебрежимо малого уровня.

Также следует отдельно отметить, что визуальное проявление наличия темнового тока на изображении будет расти, при условии постоянства температуры, с увеличением времени накопления кадра, так как увеличивается время накопления шумового заряда в том числе.

Еще одним источником шумов на изображении является шум считывания, который добавляется к информационному сигналу предварительным усилителем в процессе преобразования уровня накопленного заряда в сигнал напряжения. Производители часто указывают его среднее (среднеквадратическое) значение, выраженное в количестве электронов на пиксел для каждой конкретной линейки сенсоров.

Данный вид шума является частотно-зависимым, поэтому с увеличением скорости считывания зарядовых пакетов увеличивается уровень добавляемого шума. Возрастание уровня шума при высоких скоростях считывания частично является следствием необходимости обеспечения большей полосы пропускания усилителя для увеличения частоты тактирования матрицы.

Как и в случае с темновым шумом, частично снизить его влияние позволяет охлаждение полупроводниковой подложки матрицы. Однако в современных сенсорах предусмотрен немного иной подход устранения шума считывания. Одним из способов обеспечения высокой скорости считывания кадра без соответствующего увеличения уровня шума является разделение кадра на несколько сегментов и передача их по различным каналам одновременно. Например, в современных матрицах компании Sony может быть предусмотрено до 4 параллельных каналов для считывания данных.

В отличие от ПЗС-матриц для КМОП-матриц характерно наличие еще одного дополнительного источника шума. Он обусловлен необходимостью преобразования уровня выходного сигнала в цифровой код при помощи АЦП. Уровень вносимого шума будет напрямую зависеть от его разрядности, так как из-за квантования уровней величина считанного заряда будет округлена до целого значения, которое способно выдать АЦП.

Снижение шума квантования возможно благодаря использованию высококачественных АЦП с большой разрядностью.

* + 1. Кодирование цветного изображения

Большинство современных фото- и видеокамер, которые позволяют получать цветные снимки, на самом деле реализованы в виде обычной светочувствительной матрицы, на которую накладывается специальный слой, состоящий из массива цветных светофильтров. Структура мозаики может быть различной, существует множество способов их организации, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Однако ввиду такого подхода часть пикселов в каждом цветовом канале окажется пустой. Для компенсации этого недостатка значения соседних пикселов необходимо каким-либо образом заполнить. Чаще всего осуществляют операцию интерполяции или простое замещение всей окрестности центрального пиксела его значением. Поэтому заметно падает разрешающая способность на изображении в цвете и становится возможным появление на изображении различных артефактов (муаров), которые проявляются в виде цветных пятен или иных структур на изображении. В зависимости от выбранной структуры мозаичного фильтра артефакты проявляются по-разному (рисунок 2.5).

Также стоит отметить, что в цветном изображении для каждого цветового канала шум может иметь разную интенсивность. Изначально все пиксели на изображении одинаково подвержены шуму, но после коррекции изображения, в том числе изменения баланса белого, в канале, где был увеличен средний уровень интенсивности, увеличивается и уровень шума.

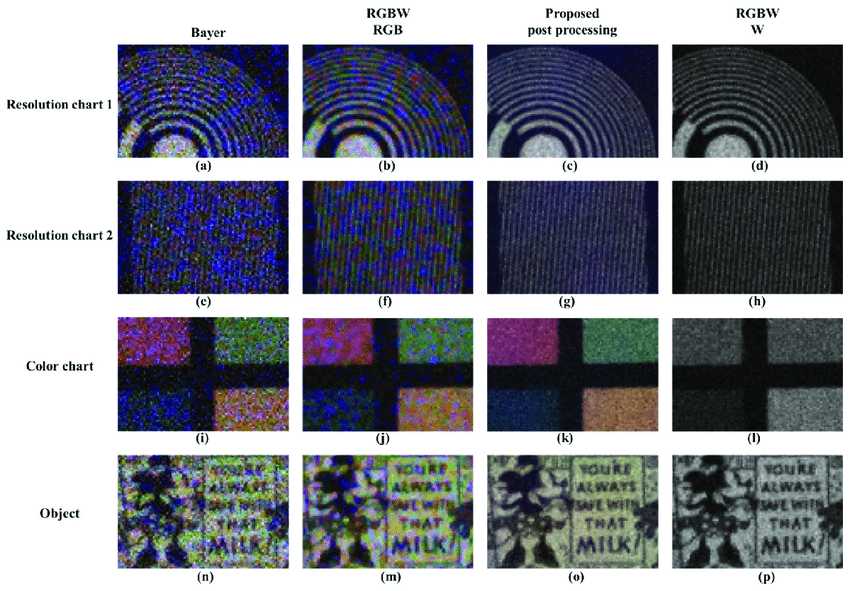


Рисунок 2.5 – Цветные муары после интерполяции каналов для различных структур мозаичных фильтров

* + 1. Канал связи

Отдельно можно выделить тип шумов, который обычно обусловлен необходимостью передачи изображения по внешним каналам связи. Мощное импульсное воздействие различных электромагнитных помех, грозовых разрядов и т.д. может исказить передаваемую во внешней среде информацию или даже полностью поглотить часть передаваемого сигнала. В таком случае на приемной стороне на месте пропавших пикселов наблюдаются черные точки, следствие отсутствия информации о потерянном пикселе, а в тех местах, где импульсная помеха многократно увеличила уровень сигнала, будет иметь место белый пиксел с максимально возможной яркостью (рисунок 2.6). Такой вид искажений относят к разряду импульсных шумов.



Рисунок 2.6 – Результат воздействия импульсной помехи

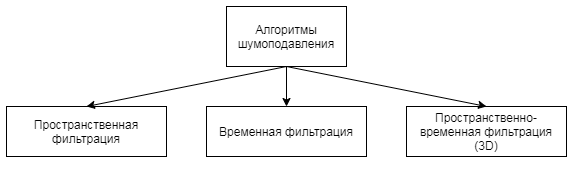
Для минимизации риска потери информации в таких случаях целесообразно использовать различные алгоритмы кодирования цифровых и аналоговых сигналов перед их передачей во внешнюю среду. Также возможна коррекция последствий воздействия импульсной помехи различными программными методами с применением специальных алгоритмов фильтрации, например, обработка медианным фильтром.

* 1. Алгоритмы шумоподавления
     1. Классификация алгоритмов шумоподавления

Наличие шумов на цифровом изображении не только портит визуальное качество восприятия кадра, но также может существенно снизить качество работы алгоритмов компьютерного зрения, так как любая шумовая составляющая вносит дополнительный объем данных для классификации объектов, поиска точек интереса и т.д., а также существенно усложнить работу алгоритмов компрессии или снизить качество его выполнения. Поэтому вопрос шумоподавления особо актуален на этапах предварительной обработки фото- и видеокадров в таких системах.

Способы борьбы с шумами на аппаратном уровне уже рассмотрены в предыдущих главах и, безусловно, тесно связаны с природой их происхождения. Однако бороться с шумами можно также и программными способами. Существует огромное количество всевозможных реализаций алгоритмов для фильтрации шумов на цифровых изображениях.

В первую очередь следует разделить известные алгоритмы по способу пространственно-временной корреляции (рисунок 2.7).

Рисунок 2.7 – Классификация алгоритмов шумоподавления взаимной корреляции

* Пространственные методы — алгоритмы шумоподавления изображения применяются для каждого кадра отдельно;
* Временные методы — усреднение между несколькими последовательно идущими кадрами. Могут появляться артефакты в виде раздвоения и размытости изображения;
* Пространственно-временные методы — так называемая 3D-фильтрация, сочетают оба метода, основаны на пространственно-временной корреляции изображения;

Пространственные методы учитывают только корреляцию между значениями соседних пикселов в некоторой окрестности. По изображению пробегают «скользящим окном» заданного размера, где центральный пиксел определенным образом заменяется на другой из его окрестности или пересчитывается, исходя методики конкретного алгоритма.

Временные методы также достаточно просты с точки зрения подхода. Если шум имеет случайный характер, то накопив несколько кадров и соответствующим образом сложив их, мы снизим уровень шумовой компоненты на изображении. Так как в одном кадре в каком-то пикселе будет присутствовать шумовой выброс, а на других нет, то и при сложении кадров результирующее значение пиксела будет содержать в значительной степени меньший уровень шумов.

Зачастую при таком подходе также выполняют анализ пикселов, находящихся в одной и той же позиции на разных кадрах, а также анализ траектории их движения, что позволяет в некоторой степени скомпенсировать размытость при движении динамических объектов в кадре. Тем не менее, основным недостатком таких алгоритмов остается именно получение посредственного качества, а порой даже и очень размытого, изображения после фильтрации.

Что же касается трехмерного 3D шумоподавления, то данный подход не имеет существенных принципиальных отличий от вышеупомянутых способов, за исключением того факта, что в нем применяется анализ сразу нескольких последовательных кадров как средствами временной, так и пространственной фильтрации. Иными словами, данный метод основан на выявлении степени различий между несколькими пикселями в каждом последующем кадре, определении уровня нежелательных искажений и определении вектора движения, что в итоге позволяет рассчитать результат по усредненному значению пикселей и получить более качественное изображение в сравнении с предыдущими подходами.

Технология 3D шумоподавления является одной из наиболее прогрессивных технологий в области подавления шумов в изображениях на сегодняшний день и представляет собой отличное средство для повышения качества снимков, сделанных в условиях плохой освещенности. Также она крайне востребована в различных системах передачи видеосигнала, в современных механизмах видеонаблюдения, поскольку позволяет проводить достаточно качественную фильтрацию от шумов различного характера и т.д.

Несмотря на значительный рост требований к производительности платформ для реализации таких алгоритмов, использование данной технологии в большинстве современных цифровых систем видеонаблюдения, является более чем оправданным, поскольку наличие шума в видеосигнале может привести не только к ухудшению визуального восприятия картинки, но и к нестабильной или малоэффективной работе всей системы в целом.

Каждый из перечисленных подходов можно также классифицировать по способу использования информации, содержащегося в изображении кадра (рисунок 2.8).

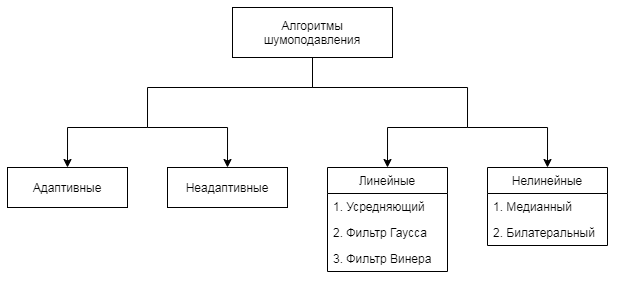


Рисунок 2.8 – Классификация по способу использования информации на изображении

На самом деле приведенная выше классификация является неполной, так как в каждой группе алгоритмов можно выделить еще несколько подгрупп, объединив алгоритмы по сходству применяемого математического аппарата, набору основных критериев для анализа и т.д. Некоторые алгоритмы могут относиться одновременно к различным группам, так как зачастую способы комбинируются для достижения лучших результатов.

В общем случае к адаптивным алгоритмам можно отнести все алгоритмы, результат обработки которых зависит не только от жестко заданных критериев, порогов, коэффициентов и т.д., но и от результатов анализа некоторой области фильтруемого изображения с последующим определением параметров обработки.

Отличным примером адаптивного алгоритма является билатеральный фильтр. В отличие от классических фильтров, таких как фильтр Гаусса, усредняющий и т.д., где результат фильтрации зависит только от евклидова расстояния от центра сканирующего окна до рассматриваемого пиксела, рассчитываются весовые коэффициенты для каждого пиксела на основе его яркости.

В то же время билатеральный фильтр относится к группе нелинейных алгоритмов, так как рассчитанное значение центрального пиксела не является линейной комбинацией входящих в окрестность маски пикселов. А различные фильтры для выделения или подчеркивания контуров, увеличения резкости, фильтры низких и высоких частот, также как и упомянутый выше фильтр Гаусса, относятся к числу линейных алгоритмов, так как результат обработки зависит только от коэффициентов маски при суммировании.

* + 1. Выбор алгоритмов для реализации в ПЛИС

При выборе алгоритмов для дальнейшей реализации необходимо учесть несколько ключевых моментов:

* Количество аппаратных блоков памяти;
* Наличие DSP блоков;
* Допустимая задержка на обработку кадра;
* Пропускная способность;

Так как ПЛИС в первую очередь является средством именно эффективной обработки данных, то аппаратные блоки двухпортовой памяти в основном используются для временного хранения небольших объемов данных и их объема может быть недостаточно для реализации промежуточной буферизации кадров видеоряда. По условиям задания на ВКР реализуемые алгоритмы должны обеспечивать обработку видеоряда высокого разрешения 1920х1080 пикселов при частоте следования кадров 60 в секунду. Таким образом, для буферизации 1 кадра при разрядности пиксела 12 бит потребуется 3 МБ, а для цветного изображения 9 МБ.

Без наличия внешней микросхемы памяти для буферизации кадров организовать алгоритмы 3D шумоподавления не представляется возможным, так же как и алгоритмы, использующие принцип временной фильтрации. Следовательно, обратим внимание на алгоритмы, основанные на принципах пространственной фильтрации.

Также необходимо учитывать, что выбранные алгоритмы должны являться частью большой системы, в которой шумоподавление является лишь одним из этапов предобработки, ввиду чего использовать все доступные ресурсы категорически недопустимо.

Выбранные алгоритмы должны поддаваться разбиению на отдельные более простые операции для организации конвейерной обработки кадра с высокой пропускной способностью, которая должна быть на уровне 3 Гбит/с, исходя из условий задания. При этом задержка на обработку кадра должна быть минимально возможной, обеспечивая обработку кадра в режиме реального времени и возможность дальнейшей интеграции в общий конвейер предобработки изображения видеосистемы.

Исходя из перечисленных требований, были выбраны 3 классических алгоритма шумоподавления: усредняющий фильтр, биномиальный фильтр (фильтр Гаусса) и медианный фильтр.

* + 1. Усредняющий фильтр

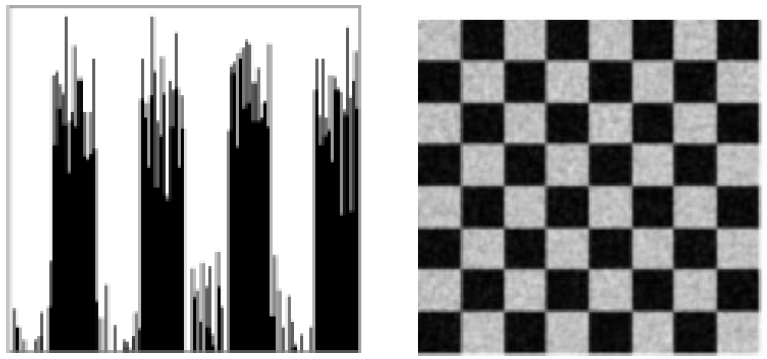
Простейшая идея удаления шума - усреднять значения пикселей в пространственной окрестности. Для каждого пикселя анализируются соседние для него пиксели, которые располагаются в некотором прямоугольном окне вокруг этого пикселя (см. рисунок 2.1.1а). Чем больше взят размер окна, тем сильнее происходит усреднение. Самый простой вариант фильтрации - в качестве нового значения центрального пиксела брать среднее арифметическое всех тех его соседей, значение которых отличается от значения центрального не более чем на некоторый порог. Чем больше величина этого порога, тем сильнее происходит усреднение.

Вместо среднего арифметического соседей можно брать их взвешенную сумму, где весовой коэффициент каждого соседнего пиксела зависит либо от расстояния в пикселях от него до центрально пикселя, либо от разницы их значений.

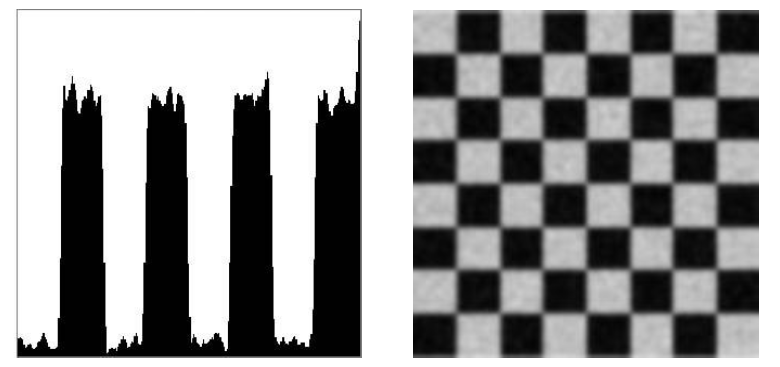
Эти алгоритмы очень простые, но они не дают хорошего результата.

Интересная модификация этого метода была предложена Де Хааном. Он предложил в качестве значения центрального пикселя также брать взвешенную сумму соседних пикселей, только соседей брать не подряд, а через один или два пикселя (см. рисунок 2.1.1б). Утверждается, что при таком подходе удается подавить низкочастотный шум, который заметнее на глаз, чем высокочастотный.

Аналогично можно применять этот метод во временной области, только усреднение будет производиться уже между соседними кадрами, и окно соответственно будет браться по времени (то есть каждый пиксель будет усредняться по пикселям, расположенным в той же позиции в соседних кадрах). В общем виде такую схему шумоподавления можно выразить следующей формулой:  
http://masters.donntu.org/2011/fknt/galiakberow/images/noise/image010.gif,  
где x - пиксель, а t - номер кадра. Веса http://masters.donntu.org/2011/fknt/galiakberow/images/noise/image012.gif могут браться в зависимости от близости значений пикселей и расстояния между кадрами. Также усреднение может проводиться рекурсивно:  
http://masters.donntu.org/2011/fknt/galiakberow/images/noise/image014.gif,  
где http://masters.donntu.org/2011/fknt/galiakberow/images/noise/image016.gif- значение, посчитанное для этого пиксела в предыдущем кадре. Для предотвращения возникновения ореолов вокруг движущихся объектов, о которых было сказано выше, во временные фильтры встраивают алгоритмы определения движения. При этом возможно два варианта: простое детектирование движения (пикселы в движущихся блоках просто остаются без изменения, и шум вдоль движущихся объектов не подавляется) или построение скомпенсированного предыдущего и/или следующего кадра (см. [27]) и смешивание текущего с ним. В последнем случае компенсация движения должна быть выполнено качественно, иначе будут артефакты на месте неправильно найденных блоков.



Зашумленное изображение



После обработки усредняющим фильтром

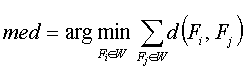
Рисунок 2.10 – Гистограммы исходного и обработанных изображений

### Медианный фильтр

Медианная фильтрация - это стандартный способ подавления импульсного шума.

Для каждого пиксела в некотором его окружении (окне) ищется медианное значение и присваивается этому пикселу. Определение медианного значения: если массив пикселей отсортировать по их значению, медианой будет серединный элемент этого массива. Размер окна соответственно должен быть нечетным, чтобы этот серединный элемент существовал.

Медиану также можно определить формулой:  
http://masters.donntu.org/2011/fknt/galiakberow/images/noise/image018.gif,  
где W - множество пикселей, среди которых ищется медиана, а fi - значения яркостей этих пикселей.

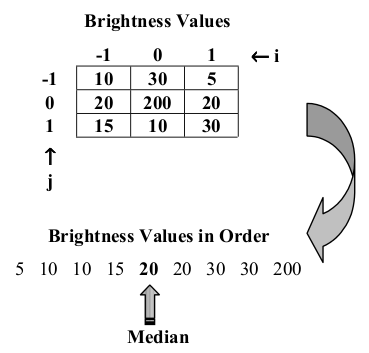
Для цветных изображений используется векторный медианный фильтр (VMF):  
,  
где Fi - значения пикселей в трехмерном цветовом пространстве, а d - произвольная метрика (например, евклидова).

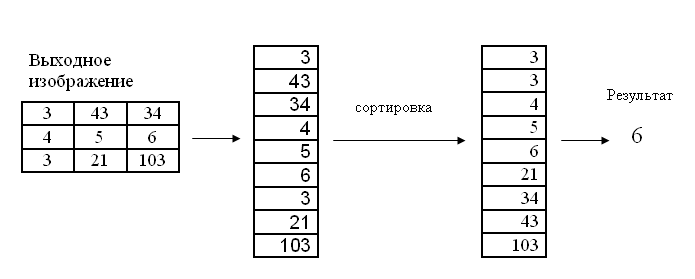
Однако в чистом виде медианный фильтр размывает мелкие детали, величина которых меньше размера окна для поиска медианы, поэтому на практике практически не используется. Пример усовершенствованной медианной фильтрации можно найти в [1].

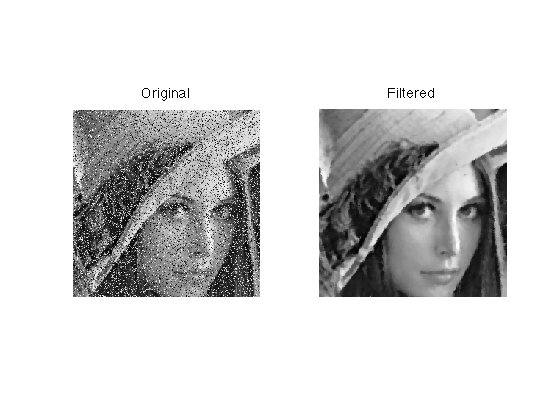
Медианный фильтр является одним из наиболее широко используемых цифровым фильтров, особо эффективен для фильтрации импульсных помех. Основная идея такого подхода заключается в сортировке значений пикселов внутри скользящего окна и выбор центрального в качестве замещающего центральный в исходном изображении. Таким образом пиксел, подвергнутый импульсному воздействию будет заменен и не окажет никакого влияния на соседние пикселы. Поэтому этот тип фильтра относится к фильтрам, сохраняющим четкость границ на изображении.

Xk, Xk-1, …. ),

,где значения Xk соответствуют элементам маски скользящего окна.







*Рис.5. Изображение подвергнутое импульсной помехе до(а) и после(б) обработки медианным фильтром*

### Биномиальный фильтр ( Гауссовское размытие )

Гауссовское размытие - это свертка изображения с функцией  
http://masters.donntu.org/2011/fknt/galiakberow/images/noise/image022.gif,  
где параметр s задает степень размытия, а параметр A обеспечивает нормировку. Фактически, это то же усреднение, только пиксель смешивается с окружающими по определенному закону, заданному функцией Гаусса. Матричный фильтр, посчитанный по указанной формуле, называется гауссианом; чем больше его размер, тем сильнее размытие (при фиксированном s). Поскольку данный фильтр сепарабелен, то есть представим в виде  
http://masters.donntu.org/2011/fknt/galiakberow/images/noise/image024.gif,  
то свертку можно производить последовательно по строкам и по столбцам, что приводит к значительному ускорению работы метода при больших размерах фильтра.

Вблизи границ (контуров на изображении) такой фильтр применять нельзя, чтобы не смазать детали изображения. Как следствие вдоль границ остается зашумленный контур.

Можно немного модифицировать этот метод для лучшей адаптации к границам: искать в каждом окне наилучшее направление размытия (наличие границы), вычисляя производные по направлениям, и применяя в данном окне направленный гауссиан вдоль найденной границы. В результате размытие будет проводиться вдоль границ изображения, и зашумленного контура не будет.

В отличие от медианного фильтра, данный фильтр размывает границы изображения, так как является линейной комбинацией пикселов, находящихся под маской скользящего окна. Часто данный фильтр применяется в алгоритмах компьютерного зрения с целью улучшения структуры изображения перед интеллектуальными обработками, чтобы исключить влияние случайных шумов на работу алгоритмов.



*Рис.6. Изображение исходное(а) и после обработки фильтром Гаусса с масками 3х3(б) и 5х5(в)*

Выбранный набор алгоритмов: усредняющий, медианный фильтры и фильтр Гаусса реализуем в практической задаче на ПЛИС.